

УДК 622.271:622.235

© Н.А. Иконникова, А.А. Юрченко, М.Ю. Иконников

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАХВАТА ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ПЫЛИ КАПЛЯМИ ВОДЫ ПРИ ЕЕ ОРОШЕНИИ

© N. Ikonnikova, A. Yurchenko, M. Ikonnikov

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE COEFFICIENT OF CAPTURE OF IRON-ORE DUST WITH WATER DROPS DURING ITS IRRIGATION

**Цель.** Установление достоверности полученных теоретических результатов по расчету коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при их орошении путём проведения экспериментальных исследований на лабораторной установке. При этом использовался метод физического моделирования пылевого облака после массовых взрывов и процесса его орошения.

**Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы физического моделирования пылевого облака после массовых взрывов в карьере и подавления диспергированной водой. Моделирование производилось на разработанной установке, в которой использованы аэродинамические методы разделения дисперсной фазы на фракции в восходящем потоке. В установке используются различные скорости осаждения частиц под воздействием силы тяжести.

**Результаты.** Экспериментальные исследования подтвердили достоверность теоретических результатов. Они показали хорошее совпадение с теоретическими исследованиями. Отклонение результатов составляет в среднем 10,2%.

**Научная новизна.** Установлена достоверность полученной ранее аналитической зависимости коэффициента захвата пылевых частиц каплями воды от диаметра капель и пылевых частиц, скорости их движения, плотности частиц пыли и вязкости среды оседания. Предложена и теоретически обоснована физическая модель пылевого облака после массовых взрывов в карьере и его орошения диспергированной водой. Подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями достоверность полученных ранее теоретических результатов.

**Практическая значимость.** Разработанная лабораторная установка позволяет проводить исследования эффективности подавления диспергированной водой пылевого облака, коэффициента захвата пылевых частиц каплями воды, прогнозировать необходимое количество воды для пылеподавления с заданной эффективностью и необходимый диаметр капель воды, проводить исследования влияния смачивателей на параметры орошения пылевого облака.

**Ключевые слова:** орошение, коэффициент, захват, пылевая частица, эффективность пылеподавления, экспериментальные исследования

**Постановка задачи.** Технологические процессы многих отраслей промышленности, особенно горнорудной, сопровождаются значительным пылеобразованием. Так добыча железной руды ведётся преимущественно открытым способом, что требует проведения массовых взрывов в карьерах, которые сопровождаются выбросом в атмосферу пыли и вредных газов в виде пылегазово-

го облака (ПГО), внося существенный вклад в снижение экологической безопасности региона.

Экологическая опасность массовых взрывов в карьерах определяется, в первую очередь, уровнем приземных концентраций загрязняющих веществ, включая пыль, за пределами санитарно-защитной зоны этих карьеров.

В работе [1] дана оценка экологической опасности выбросов в атмосферу пыли и газов после массовых взрывов в карьерах. Установлены фактические значения концентрации пыли в пылегазовом облаке на различном удалении от карьера, получена аналитическая зависимость концентрации пыли на оси факела облака от расстояния до эпицентра взрыва. В работе исследовано содержание химических элементов в почве загрязнённых прилегающих территорий, которые подтверждают опасность выбросов после массовых взрывов в карьерах в связи с наличием в них ядовитых элементов – свинца, марганца и хрома. Здесь же приведена оценка токсичности пыли пылегазового облака путём исследования её влияния на урожайность сельскохозяйственных культур. Установлено, что токсичность пыли ПГО зависит от состава субстрата, причём с повышением содержания в нём физической глины на 20% токсичность пыли возрастает в 1,7-2,6 раза. Эти исследования подтверждают актуальность разработки мероприятий по подавлению пылегазового облака после массовых взрывов в карьерах, исследований методов и средств решения этой задачи.

Наиболее широко распространенным методом пылеподавления является орошение запылённой атмосферы. При этом основным показателем орошения является эффективность пылеподавления, которая в общем случае определяется способностью улавливания пылевых частиц каплями воды. Эта способность характеризуется коэффициентом захвата пылинок сферической каплей воды. В настоящей работе поставлена задача разработки лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований параметров орошения пылевого облака.

**Нерешённые аспекты проблемы.** При решении вопросов организации пылеподавления путём орошения пылевого облака необходимо установить, какие размеры капель воды наиболее эффективно улавливают частицы взвешенной пыли. Кроме этого, важнейшим вопросом для организации орошения пылевого облака является определение необходимого количества орошаемой жидкости, чаще всего воды, для достижения желаемого эффекта пылеподавления. При решении этих и других вопросов подавления пылевого облака необходимо знать суммарный коэффициент захвата пылевых частиц каплями воды [2]. Проведённые ранее теоретические исследования по определению суммарного коэффициента захвата частиц железорудной пыли каплями воды требуют экспериментальной проверки адекватности полученных результатов. Проведение таких экспериментов в натурных условиях массовых взрывов в карьерах весьма сложно в техническом и организационном отношении. Поэтому целесообразна первона-

чальная разработка лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований параметров орошения при подавлении пылевого облака.

**Анализ последних исследований.** В работе [3] рассмотрены процессы адгезии и смачивания как межфазовые взаимодействия между пылевой частицей и орошаемой жидкостью, адсорбционная способность на границах “твёрдое тело – жидкость”, явление коагуляции под воздействием растворов. Эти физико-химические факторы являются научной основой разработки способов и средств борьбы с вредными выбросами на открытых горных работах.

На наш взгляд все эти явления комплексно учитывает суммарный коэффициент захвата пылевой частицы каплями орошаемой жидкости [2].

В работе [4], посвященной анализу орошения как процесса, при котором происходит прочёсывание пылевого облака падающими каплями жидкости, предполагается, что поток воздуха стационарен относительно капли, массовая концентрация пыли не влияет на движение воздуха и на движение каждой из частиц, размер капель намного больше размера частиц пыли, форма частиц сферическая и т.д.

Скорость движения капель жидкости в процессе орошения облака обусловлена силами гравитации и зависит от их диаметра. При движении капель воды в гравитационном поле их скорость отличается от скорости осаждения пылевых частиц, начиная с размера капель  $r \geq 0,4$  мм. С увеличением размера капли возрастает скорость её падения. При  $r > 2$  мм увеличение скорости прекращается из-за деформации капель, которая при  $r = 2,5-3$  мм приводит к их разрыву.

Эффективность улавливания аэрозолей, согласно расчётам Фукса, прежде всего, определяется размером частиц. В случае малых относительных скоростей для частиц пыли малых размеров (1-2 мкм) установлено, что чем крупнее капли, тем эффективность улавливания выше. Захват частиц каплями зависит от нескольких факторов. При совместном движении капель жидкости и твёрдых частиц на пылинку действуют силы тяжести и инерции, а также аэродинамические силы. Для эффективного улавливания витающих частиц диспергированной жидкостью необходимо выполнение четырёх последовательных стадий:

- встреча пылинки с каплей на пути своего движения;
- соприкосновение пылинки с каплей;
- смачивание и захват пылинки каплей;
- соединение капли с уловленными пылинками.

В работе [2] получено выражение для расчёта эффективности пылеулавливания  $\eta$  каплями воды в виде

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} m \frac{\omega}{g} \frac{H}{d_k} \eta_{\Sigma}\right). \quad (1)$$

Таким образом, эффективность пылеулавливания повышается при увеличении суммарного коэффициента захвата частиц сферической каплей  $\eta_{\Sigma}$ , высоты контакта жидкости с облаком  $H$ , относительной скорости движения капли и

пылевой частицы  $\omega$ , показателя орошения пыли  $m$  как отношение объёмов орошаемой жидкости и пылевого облака. Снижается эффективность пылеулавливания при увеличении диаметра капель орошаемой жидкости и скорости их осаждения в гравитационном поле.

Техническими методами можно повышать эффективность пылеулавливания за счет повышения суммарного коэффициента захвата пылевых частиц сферической каплей и показателя орошения пыли, который определяется возможностями средств доставки жидкости. Остальные параметры обусловлены технологией разрушения горного массива и аэродинамическими параметрами атмосферного воздуха.

При инерционном осаждении частиц пыли на капле коэффициент захвата  $\eta_{\Sigma}$  зависит от числа Стокса ( $K$ ) и режима течения воздуха, обтекающего каплю.

Результаты исследований дисперсного состава пыли в 20 м от взрывающегося блока без применения средств пылеподавления приведены в табл. 1.

Таблица 1

Дисперсный состав пылевых частиц, образующихся после массовых взрывов в карьерах ОАО «ИнГОК» без средств пылеподавления

Показатель дисперсного состава	Фракции пыли, мкм						
Диаметр пылевых частиц, мкм	< 1,4	1,4-4,2	4,2-10	10-15	15-30	30-45	45-100
Содержание пылевых частиц, %	10,67	11,24	12,46	14,15	15,88	17,37	18,24

Таким образом, можно сделать важный вывод о том, что пылегазовое облако содержит значительное количество (до 35%) тонкодисперсной (респиральной) пыли с размерами частиц 1,4-10 мкм. Эта фракция следует за линиями тока воздуха, поэтому рассеивается в атмосфере сильнее других, медленнее оседает, а ее доля в осевшей пыли растёт с удалением от взорванного блока.

С течением времени доля тонкой пыли в пылевом облаке достигает 100%, поскольку крупные частицы довольно быстро оседают в атмосфере.

В работе [2] приведены методика и результаты расчётов коэффициента захвата частиц железорудной пыли каплями воды для стоксовской и надстоксовской областей. Диаметр частиц пыли составлял 1; 3; 7; 13; 23; 38; 73 мкм, а капель воды – 20; 50; 100; 300; 600; 1000; 1500; 2000; 2500 мкм.

Проведенные теоретические исследования позволили сделать выводы:

-эффективность подавления пылевого облака каплями орошаемой воды определяется установленным выражением и нелинейно зависит от объёма пылевого облака, количества орошаемой жидкости, скорости движения капель жидкости и твёрдых частиц, диаметра капель, высоты орошаемого облака, а также суммарного коэффициента захвата пылинок каплями жидкости;

- суммарный коэффициент захвата пылевых частиц каплями воды зависит от диаметра капель и пылевых частиц, скорости их движения, плотности частиц пыли и вязкости среды. Рассчитаны его значения для частиц железорудной пыли различных фракций и диаметров водяных капель. Установлено, что максимальное значение суммарного коэффициента захвата для тонкодисперсной железорудной пыли имеет максимальное значение при диаметре капель воды 1 – 1,5мм и равен 0,488. Для грубодисперсной железорудной пыли коэффициент захвата при этих диаметрах капель воды изменяется от 0,815 до 0,996. Таким образом, подтверждается то положение, что чем больше диаметр витающей пыли, тем выше коэффициент захвата её каплями орошаемой жидкости.

**Цель.** Установление достоверности полученных теоретических результатов по расчету коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при их орошении экспериментальным путём на лабораторной установке.

**Представление основного материала.** Исследования процесса формирования ПГО при массовых взрывах показали, что первоначально в атмосферу выбрасываются продукты детонации с определённой начальной скоростью движения, зависящей от динамического фактора взрыва. В последующем скорость подъёма облака снижается, а процесс его дальнейшего развития идёт за счёт теплового фактора (за счёт конвекции, поскольку температура ПГО превышает температуру окружающей среды). При этом время действия динамического фактора исчисляется до одной секунды, а температурного – минутами.

Промышленные исследования показали, что через 55-65с ПГО начинает терять свои чёткие очертания и через несколько минут скорость развития становится минимальной и равной скорости ветра у поверхности карьера. Газы и мелкие частицы пыли, в зависимости от скорости ветра, распространяются на различные расстояния от места производства взрыва (обычно до 2-3 км, при сильном ветре до 10 км).

Изучение процесса формирования пылегазового облака производилось с учётом предположения о независимости динамического и теплового факторов, влияющих на этот процесс, так как тепловые потери в период действия динамического фактора незначительны.

Исследованиями установлено, что высота подъёма пылегазового облака от поверхности земли на период его окончательного рассеивания, дальность распространения в приземном слое атмосферы и время его существования зависят от количества ВВ, взрываемого в карьере, метеорологических параметров окружающей среды и температурной стратификации атмосферы.

По результатам ряда исследований установлено, что при удельном расходе ВВ  $0,37 - 1,03 \text{ кг/м}^3$  образуется от  $0,03$  до  $0,17 \text{ кг}$  пыли на  $1 \text{ м}^3$  горной массы, причём пыль содержит твёрдые частицы, которые различны по плотности и размерам. Энергией взрыва они поднимаются на различную высоту, при этом происходит более интенсивное оседание крупных и тяжёлых частиц, в сравнении с мелкими и лёгкими. Влияние температурной стратификации атмосферы приводит к тому, что полидисперсное облако при рассеивании на высоте распадается на относительно монодисперсные слои.

Дальнейшее движение частицы будет замедляться за счёт воздействия на неё силы сопротивления движению (силы вязкости) и силы тяжести. По мере остывания продуктов детонации тепловой напор будет снижаться, что вызывает уменьшение скорости движения пылевой частицы и пропорциональной ей силы сопротивления. В конечном итоге разнонаправленные силы, воздействующие на пылевую частицу, сравняются и частица прекратит движение вверх, достигнув максимальной высоты подъёма.

В связи со сложностью проведения натурных экспериментов по исследованию параметров орошения пылегазового облака после массовых взрывов в карьере была разработана установка, в которой использованы аэродинамические методы разделения дисперсной фазы на фракции в восходящем потоке. В установке используются различные скорости осаждения частиц под воздействием силы тяжести.

Для последующих исследований эффективности взаимодействия пылевых частиц и капель воды была собрана установка, схема которой представлена на рис.1.

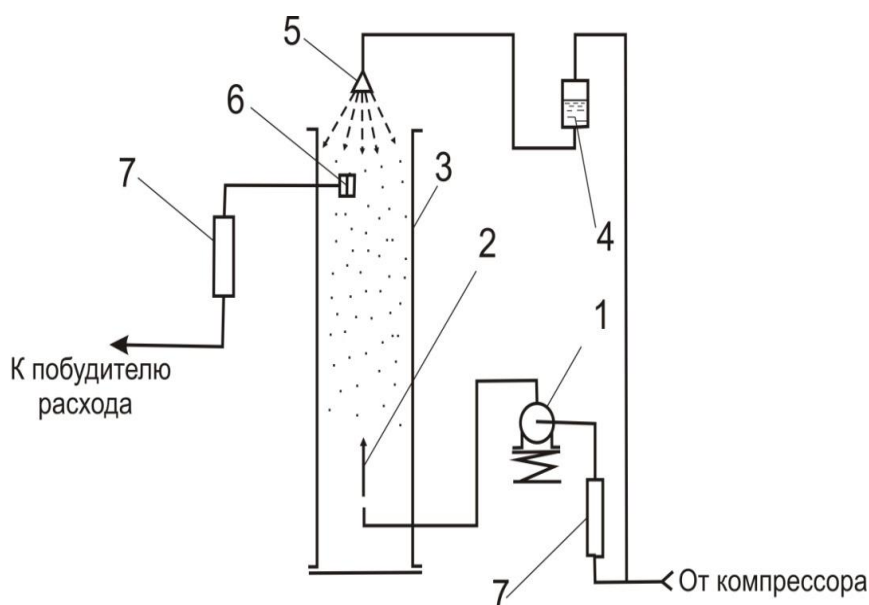


Рис.1 Схема установки сепарации частиц пыли в воздушном потоке:  
 1 – вибрационный пылеподатчик; 2 – подаваемый аэрозоль; 3 – камера в виде цилиндрической трубы; 4 – дозатор подачи воды; 5 – гидрофорсунка;  
 6 – патрон с аэрозольным фильтром; 7 – ротаметр.

Установка работает следующим образом: из вибрационного пылеподатчика 1 под действием потока воздуха от компрессора аэрозоль 2 поступает в камеру воздушной сепарации 3, где происходит естественное распределение частиц пыли по высоте, пропорционально скорости их оседания (витания). Камера воздушной сепарации представляет собой вертикальную цилиндрическую трубу диаметром 0,3 м и высотой 2 м.

Массовая концентрация пыли контролировалась весовым методом путём отбора проб на аэрозольный фильтр 6. С помощью ротаметра 7 осуществлялось измерение расхода воздуха через камеру 3 и аэрозольный фильтр 6. Для орошения пылевого облака в камере использовалась вода, которая из дозатора 4 под действием давления воздуха от компрессора поступает в форсунку 5 для орошения пыли.

Уравнение движения пылевой частицы в восходящем потоке воздуха в соответствии со вторым законом Ньютона запишется в виде

$$ma = \sum F, \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;  $a$  – ускорение движения частицы, м/с<sup>2</sup>;  $\sum F$  – сумма сил, действующих на частицу, Н.

На частицу при её подъёме действуют следующие силы:

1.  $F_c = 3\pi\mu d_p v$  – сила аэродинамического сопротивления воздуха, Н. Здесь  $\mu = 18.2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость воздуха;  $d_p$  – диаметр пылевой частицы, м;  $v$  – скорость движения частицы, м/с. Сила направлена против вектора скорости подъёма частицы.

2.  $F_g = mg$  – сила тяжести. Н. Здесь  $m$  – масса частицы, кг;  $g$  – ускорение земной тяжести, м/с<sup>2</sup>. Сила направлена против вектора скорости подъёма частицы.

3.  $F_L = \frac{\gamma}{2g} v^2 S_M$  – сила лобового давления воздуха на пылевую частицу, Н. Здесь  $\gamma = 11,8 \text{ Н/м}^3$  – удельный вес воздуха;  $v$  – скорость движения воздуха, м/с;  $S_M = \frac{\pi d_p^2}{4}$  – миделево сечение пылевой частицы, м<sup>2</sup>. Сила направлена по вектору скорости подъёма частицы.

4.  $F_a$  – архимедова сила, Н. Направлена по вектору скорости подъёма частицы.

5.  $F_{in}$  – силы инерции, вызванные силами инерции вытесненного пылевой частицей воздуха и силами инерции при изменении ускорения движения частицы, Н. Направлены по вектору скорости подъёма частицы.

Поскольку плотность воздуха на три порядка меньше плотности железорудной пыли, а объём вытесненного пылевой частицей воздуха ничтожно мал, то действием архимедовой силы и силами инерции можно пренебречь. В этом случае уравнение (2) примет вид:

$$ma = F_L - F_c - F_g.$$

Когда уравновесятся силы, действующие на частицу в направлении и против её подъёма, частица остановится. Но в этом случае и сила аэродинамического сопротивления воздуха  $F_c = 0$ , так как скорость движения частицы равна нулю. Таким образом, баланс сил, действующих на остановившуюся частицу, будет иметь вид

$$F_n = F_g. \quad (3)$$

Выразим силы в уравнении (3) через их параметры

$$mg = \frac{\gamma \vartheta^2}{2g} \frac{\pi d_q^2}{4}. \quad (4)$$

Так как масса пылевой частицы  $m = \rho \frac{\pi d_q^3}{6}$ , (здесь  $\rho = 4000 \text{ кг/м}^3$  – плотность пылевой частицы,  $\text{кг/м}^3$ ) то выражение (4) после преобразований и сокращений примет вид

$$\frac{\rho g d_q}{3} = \frac{\gamma \vartheta^2}{4g}. \quad (5)$$

Из выражения (5) находим аналитическую зависимость для вычисления скорости движения воздуха в камере воздушной сепарации, при которой исследуемая фракция пыли зависнет в камере:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{4\rho g^2 d_q}{3\gamma}}$$

Для частицы железорудной пыли с  $\rho = 4000 \text{ кг/м}^3$  и диаметром  $d_q = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  скорость восходящего потока воздуха, при которой она зависнет в камере сепарации, составляет  $0,02 \text{ м/с}$ .

Следующим этапом расчёта параметров воздушной сепарации является определение расхода воздуха в камере для обеспечения расчётной скорости его движения и необходимого диаметра выходной насадки пылеподатчика.

Расчётная скорость в трубе будет иметь место при объёмном расходе:

$$Q = \mathcal{Q} S = \frac{\mathcal{Q} \pi d^2}{4},$$

где  $Q$  – объёмный расход воздуха в воздушном сепараторе,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\mathcal{Q} = 0,02 \text{ м/с}$  – расчётная скорость сепарации пылевых частиц;  $d = 0,3 \text{ м}$  – диаметр воздушного сепаратора.

После вычислений устанавливаем, что для выполнения поставленной задачи необходимо в сепараторе обеспечить расход воздуха  $0,001413 \text{ м}^3/\text{с}$ . Поскольку такой расход воздуха в эксперименте предусматривается измерять с помощью ротаметра, шкала которого градуирована в л/мин, то в этих единицах необходимый расход воздуха составляет  $84,8 \text{ л/мин}$ .

Расчёты турбулентной свободной струи показали, что скорость движения воздуха, равная  $0,02 \text{ м/с}$ , в центре трубы на высоте  $1,5 \text{ м}$  при расчётном расходе воздуха будет обеспечиваться при диаметре выходной насадки пылеподатчика, равным  $0,1 \text{ м}$ .



Программой исследований предусматривается экспериментальная проверка значения коэффициента захвата каплями воды диаметром 1,5 мм пылевых частиц железорудной пыли диаметром 1 мкм.

Для получения железорудной пыли с исследуемыми диаметрами частиц был использован вибрационный пылеподатчик, который представляет собой толстостенную цилиндрическую ёмкость с герметично закрывающейся крышкой посредством резьбового соединения. Пылеподатчик имеет два патрубка – входной, который размещён по центру крышки, и выходной в верхней части. Пылеподатчик жёстко закреплён на площадке с упругой подвеской. На этой же площадке закреплён электродвигатель, на валу которого эксцентрично закреплён груз массой 50 грамм. В пылеподатчик загружается железная руда массой 0,5 кг. При работе электродвигателя площадка с закреплённым оборудованием вибрирует с амплитудой до 1 см и вследствие этого руда в камере пылеподатчика измельчается за счёт трения кусочков руды между собой и о стенки камеры. Входной патрубок пылеподатчика соединён резиновой трубкой через ротаметр со стационарным компрессором. Необходимый расход воздуха регулируется дросселем на компрессоре. С выходного патрубка пылеподатчика по резиновой трубке, в конце которой установлена выходная насадка диаметром 0,1 м, запылённый воздух подаётся в нижнюю часть вертикальной камеры воздушной сепарации. Для исключения возможности возникновения естественной тяги в камере воздушной сепарации основание трубы закрывалось герметичной крышкой.

Всасывающий патрубок компрессора используется в качестве побудителя расхода для отбора проб запыленного воздуха с последующим определением концентрации пыли в камере сепарации весовым методом. Для этого всасывающий патрубок компрессора через ротаметр соединён с патроном аэрозольного фильтра, который размещён по центру сечения трубы в верхней её части на расстоянии 0,5 м от выхода из трубы. Необходимый расход воздуха регулируется дросселем на компрессоре.

Система орошения пылевого облака в камере сепарации состоит из форсунки типа Ф-15, которая образует капли со средним диаметром около 1,5 мм. Форсунка с помощью резиновой трубки соединена с выходным патрубком сосуда для воды ёмкостью 1 литр. Входной патрубок сосуда подключён к нагнетательному патрубку компрессора. Для регулирования давления воздуха в сосуде и интенсивности орошения использовался дроссель на компрессоре.

Эффективность пылеулавливания зависит в нашем эксперименте от показателя орошения пыли в камере сепарации и коэффициента захвата пылевых частиц водяными каплями. Показатель орошения при проведении эксперимента определяется отношением объёма орошаемой жидкости к объёму камеры. Примем максимальное расчётное значение показателя орошения равным  $0,0315 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Расчёты показали, что для обеспечения такого показателя орошения

пылевого облака в камере сепарации, на него через форсунку необходимо подать 11,1 см<sup>3</sup> воды.

Далее в ходе эксперимента измерялась запылённость воздуха заданной дисперсности до орошения облака и после его орошения с заданным показателем орошения. По этим данным рассчитывалась эффективность пылеподавления как отношение значения уменьшения запылённости в результате орошения к значению запылённости воздуха до орошения:

$$\eta = \frac{C - C_1}{C},$$

где  $\eta$  - эффективность пылеподавления;  $C$ ,  $C_1$  - запылённость воздуха в камере сепарации до и после орошения, мг/м<sup>3</sup>.

По этим данным при известной скорости осаждения капель воды, равной 6,04 м/с, рассчитываем суммарный коэффициент захвата пылевых частиц каплями воды, сравниваем его с расчётным и делаем выводы о погрешности выполненных теоретических исследований. Для нивелирования случайных помех эксперимент проводится не менее трёх раз.

Этапы проведенных экспериментальных исследований и их результаты:

1. В пылеподатчик помещается 0,5 кг железной руды плотностью 4000 кг/м<sup>3</sup>.

2. Время сепарации, продолжительность продувания тонкодисперсной пыли, принимается не менее 8 часов. Далее включается компрессор и электродвигатель вибрационного пылеподатчика, дросселем компрессора устанавливается расход воздуха через пылеподатчик, равным 84,8 л/мин. Процесс сепарации осуществляется в течение установленного времени.

3. По истечению установленного времени сепарации осуществлялся замер запылённости воздуха в камере сепарации весовым методом. Для этого через аэрозольный фильтр АФА, который помещался в специальный патрон, протягивался запылённый воздух из камеры сепарации в объёме 10 л. Для этого дросселем компрессора устанавливался расход воздуха через ротаметр системы контроля запылённости в объёме 1 л/мин. Забор запылённого воздуха осуществлялся в течение десяти минут. Далее фильтр снимался и взвешивался на аналитических весах. После вычитания из полученной массы фильтра с привеской пыли при известной массе чистого фильтра определялась масса привески пыли на фильтре. Запылённость воздуха в камере сепарации вычислялась по выражению:

$$C = \frac{m_1 - m_0}{Vt} 1000,$$

где  $C$  - запылённость воздуха в камере сепарации в точке отбора пробы, мг/м<sup>3</sup>;  $m_1$  - масса фильтра с привеской пыли, мг;  $m_0$  - масса фильтра без привески, мг;  $V$  - объёмный расход запылённого воздуха через фильтр, л/мин;  $t$  - время отбора пробы запылённого воздуха, мин. Результаты измерений и вычислений представлены в табл. 2.

Таким образом, средняя концентрация исследуемой фракции пыли в камере сепарации составила 1733 мг/м<sup>3</sup>.

Таблица 2

Результаты измерения запылённости воздуха в камере сепарации до орошения

№ эксперимента	m <sub>0</sub> , мг	m <sub>1</sub> , мг	V, л/мин	t, мин	C, мг/м <sup>3</sup>
1	3232	3247	1	10	1500
2	3147	3170	1	10	1700
3	3178	3198	1	10	2000

4. В каждом эксперименте по окончанию процесса сепарации и снятия патрона с аэрозольным фильтром проводилось орошение пылевого облака в камере сепарации со следующей последовательностью операций:

- выключался электродвигатель вибрационного пылеподатчика и перекрывался дроссель подачи воздуха через него;
- открывался дроссель для подачи воздуха в заправленный водой дозатор;
- под действием давления воздуха в дозаторе вода поступает к форсунке и в течении 30-35 с осуществлялось орошение пылевого облака в камере сепарации;
- измерялась запылённость воздуха в камере сепарации после орошения по приведенной выше методики при демонтированном пылеподатчике.

Результаты измерений и вычислений представлены в табл. 3. Средняя запылённость воздуха после орошения пылевого облака в исследуемой точке камеры сепарации составляла 866 мг/м<sup>3</sup>. Эффективность пылеподавления при этом

$$\eta = \frac{1733 - 866}{1733} = 0,5$$

Таблица 3

Результаты измерения запылённости воздуха в камере сепарации после орошения

№ эксперимента	m <sub>0</sub> , мг	m <sub>1</sub> , мг	V, л/мин	t, мин	C, мг/м <sup>3</sup>
1	3121	3129	1	10	800
2	3174	3183	1	10	900
3	3222	3231	1	10	900

Далее после преобразования выражения (1) относительно суммарного коэффициента захвата  $\eta_{\Sigma}$  получим:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\ln \frac{1}{1-\eta}}{\frac{3}{2} m \frac{\omega}{g} \frac{H}{d_k}}, \quad (6)$$

где  $\eta = 0,5$  – эффективность пылеподавления пылевого облака водяными каплями в камере сепарации;  $m = 0,0315 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{м}^3$  – показатель орошения пылевого облака в камере сепарации;  $\omega = g - u = 6,04 - 0,00012 = 6,04 \text{ м/с}$  – относительная скорость движения капель воды и пылевых Частиц;  $g = 6,04 \text{ М/С}$  – Скорость Движения Капель воды;  $H = 2\text{м}$  – высота камеры сепарации;  $d_k = 1500 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  – диаметр водяных капель.

После подстановки численных значений в выражение (6) получаем значение суммарного коэффициента захвата пылевых частиц каплями воды в камере сепарации, который равен 0,441. Отклонение значения этого коэффициента от расчётного составило 10,2 %.

**Результаты.** 1. Эффективность подавления пылевого облака каплями воды определяется установленным выражением и нелинейно зависит от объёма пылевого облака, количества орошаемой жидкости, скорости движения капель жидкости и твёрдых частиц, диаметра капель, высоты орошаемого облака, а также суммарного коэффициента захвата пылинок каплями жидкости.

2. Суммарный коэффициент захвата пылевых частиц каплями воды зависит от диаметра капель и пылевых частиц, скорости их движения, плотности частиц пыли и вязкости среды.

3. Экспериментальные исследования суммарного коэффициента захвата аэрозольных частиц мелкодисперсной железорудной пыли каплями воды показали хорошее совпадение с теоретическими исследованиями. Отклонение результатов составляет 10,2%.

**Выводы.** Проведенные ранее нами теоретические исследования и проверка их достоверности экспериментальным путём позволяют сделать следующие выводы:

- наиболее опасная с гигиенической и экологической точки зрения мелкодисперсная железорудная пыль имеет низкую эффективность подавления путём её орошения (не более 50%);

- для повышения эффективности подавления мелкодисперсной пыли в карьере необходимо проведения дополнительных мер по улучшению её смачивания орошаемой жидкостью.

### Перечень ссылок

1. Зберовский, А. В., Савотченко, Е. Н. (2015) Экологическая оценка воздействия пылегазовых выбросов при взрывных работах в карьерах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (47), 51-58.
2. Юрченко, А. А. (2012) Исследование коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при орошении. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (39), 187-194.
3. Тыщук, В.Ю. *Влияние поверхностных явлений в дисперсных системах на процессы подавления пыли и вредных газов в воздухе рабочих зон на открытых горных разработках*
4. (knu.edu.ua/Files/94\_2011/47.pdf)
5. Юрченко, А. А. (2014) Исследование методов повышения экологической безопасности массовых взрывов в карьерах по пылевому фактору. *Розробка родовищ: Зб. наук. пр.* (Т. 8), 487-496.

### АНОТАЦІЯ

**Мета.** Встановлення достовірності отриманих теоретичних результатів з розрахунку коефіцієнта захоплення аерозольних часток краплями води при їх зрошенні шляхом проведення експериментальних досліджень на лабораторній установці. При цьому використовувався метод фізичного моделювання пилової хмари після масових вибухів і процесу його зрошення.

**Методика.** Для досягнення поставленої мети використано методи фізичного моделювання пилової хмари після масових вибухів в кар'єрі і придушення дисперговою водою. Моделювання проводилося на розробленій установці, в якій використані аеродинамічні методи поділу дисперсної фази на фракції в висхідному потоці. В установці використовуються різні швидкості осадження частинок під впливом сили тяжіння.

**Результати.** Експериментальні дослідження підтвердили достовірність теоретичних результатів. Вони показали хороший збіг з теоретичними дослідженнями. Відхилення результатів складає в середньому 10,2%.

**Наукова новизна.** Встановлено достовірність отриманої раніше аналітичної залежності коефіцієнта захоплення пилових частинок краплями води від діаметра крапель і пилових частинок, швидкості їх руху, щільності частинок пилу і в'язкості середовища осідання. Запропонована і теоретично обґрунтована фізична модель пилової хмари після масових вибухів в кар'єрі і її зрошення дисперговою водою. Підтверджено проведеними експериментальними дослідженнями достовірність отриманих раніше теоретичних результатів.

**Практична значимість.** Розроблена лабораторна установка дозволяє проводити дослідження ефективності придушення дисперговою водою пилової хмари, коефіцієнта захоплення пилових частинок краплями води, прогнозувати необхідну кількість води для пилоподавлення із заданою ефективністю і необхідний діаметр крапель води, проводити дослідження впливу змочувачів на параметри зрошення пилової хмари.

**Ключові слова:** зрошення, коефіцієнт, захоплення, пилова частинка, ефективність пилоподавлення, експериментальні дослідження

## **ABSTRACT**

**Purpose.** Establishment of reliability of the theoretical results obtained by calculating the capture efficiency of aerosol particles with water drops during its irrigation by carrying out experimental works on a laboratory installation. In this case, the method of physical modeling of a dust cloud after massive explosions and the process of its irrigation was used.

**Methodology.** To achieve this objective, the methods of physical modeling of a dust cloud after massive explosions in a quarry and suppression of dispersed water were used. The modeling was performed on the developed installation, which uses aerodynamic methods for dividing the dispersion phase into fractions in the upward stream. The installation uses different rates of settling of particles under the influence of gravity.

**Results.** Experimental works have confirmed the reliability of theoretical results. They showed good agreement with theoretical studies. The deviation of the results averages 10.2%.

**Scientific novelty.** The reliability of the previously obtained analytical dependence of the capture coefficient of dust particles by the drops of water on the diameter of droplets and dust particles, the speed of their motion, the density of dust particles and the viscosity of the settling medium is established. A physical model of a dust cloud after massive explosions in a quarry and its irrigation with dispersed water is proposed and theoretically substantiated. The reliability of the theoretical results obtained earlier is confirmed by the experimental works carried out.

**Practical significance.** The developed laboratory installation allows to conduct research on the effectiveness of the suppression of dispersed water by a dust cloud, the coefficient of capture of dust particles by water drops, to predict the necessary amount of water for dust suppression with a given efficiency and the required diameter of water drops, to carry out studies of the effect of wetting reagents on the parameters of irrigation of a dust cloud.

**Keywords:** *irrigation, coefficient, capture, dust particle, efficiency of dust suppression, experimental works*